

## АНИЗОТРОПИЯ ЭПР-ПОГЛОЩЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВ R – Ba – Cu – O (ОБЛАСТЬ МАЛЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ)

Ю.И.Веснин, В.Е.Истомин, Э.Г.Косцов

Установлено, что в монокристаллах R – Ba – Cu – O при  $T = 77 - 92$  К, низкотепловое ЭПР-поглощение возможно только при определенных ориентациях плоскости кристалла относительно направлений постоянного,  $H_{\perp}$ , и переменного магнитных полей, оно максимально при расположении оси  $C$  кристалла под углом  $45^{\circ}$  к  $H_{\perp}$ .

В ряде работ было показано, что в керамических образцах сверхпроводников R – Ba – Cu – O имеет место, при использовании методики ЭПР-спектроскопии в малых магнитных полях, аномально высокое поглощение энергии СВЧ излучения<sup>1-9</sup>. Механизм этого явления не нашел пока однозначного объяснения. В частности, предполагается, что он имеет нерезонансный характер и обуславливается множеством джозефсоновских контактов<sup>1-4</sup>, потерями энергии на границах зерен<sup>5-7</sup>, либо этот механизм связан с резонансным поглощением энергии свободными носителями заряда с изменением заселенности магнитных уровней<sup>8,9</sup>.

Исследование указанного эффекта в монокристаллах может дать дополнительную информацию для установления его природы.

Целью настоящей работы являлось изучение основных закономерностей, характерных для указанной части ЭПР-спектра в монокристаллах  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ ,  $EgBa_2Cu_3O_{7-y}$ . Они были получены методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве<sup>10,11</sup>. Их размеры составили  $(4 - 6) \times (3 - 4) \times (0,07 - 0,2)$  мм<sup>3</sup>, ось  $C$  нормальна к плоскости образца, температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c = 90 - 92$  К.

Измерение ЭПР-спектров производилось с помощью радиоспектрометра с частотой клистрона  $\omega = 9,3 \cdot 10^9$  Гц и частотой модуляции  $9,75 \cdot 10^5$  Гц при возбуждении в цилиндрическом резонаторе волны  $H_{011}$ . Образец помещался в пучность магнитного поля, при этом обеспечивалось воспроизводимое вращение его вокруг ортогональных осей с точностью  $2 - 3^{\circ}$ .

Результаты исследований дали возможность выявить следующие закономерности:

1. В отличие от контрольных керамических образцов с такими же геометрическими размерами, химическим составом и значениями  $T_c$  в монокристаллах наблюдается ярко выраженная чувствительность амплитуды ЭПР-сигнала  $dP/dH$  и формы линии поглощения к ориентации плоскостей образца относительно направления постоянного магнитного поля  $H_{\perp}$ . Сигнал практически не фокусируется при следующих ориентациях монокристалла: а) ось  $C$  кристалла параллельна направлению  $H_{\perp}$ , при этом вращение кристалла как вокруг оси  $C$ , так и вокруг оси, параллельной направлению магнитной компоненты СВЧ поля  $H_{\sim}$  не приводит к появлению сигнала, (в том числе при положении плоскости пластины под углом  $45^{\circ}$  к  $H_{\perp}$ ); б) ось  $C$  параллельна направлению  $H_{\sim}$ , вращение кристалла как вокруг оси  $C$ , так и вокруг оси  $\uparrow\uparrow H_{\perp}$  не изменяет амплитуды  $dP/dH$ .

Наибольший интерес представляет поведение  $dP/dH(\theta)$  при таком вращении монокристалла, когда ось  $C$  лежит в плоскости ( $H_{\perp} H_{\sim}$ ). Рис. 1а характеризует угловую зависимость  $dP/dH(\theta)$  при вращении образца вокруг оси  $y$  (см. рис. 1б), она может быть аппроксимирована соотношением  $dP/dH \sim \sin 2\theta^2$ . На рис. 2 представлена серия осциллограмм,

1) Образцы характеризуются наличием двойников в плоскости (001).

2) В работе<sup>11</sup> сигнал ЭПР, слабовыраженный, наблюдается при  $C \uparrow\uparrow H_{\perp}$  и  $C \perp H_{\perp}$ , вероятно это связано (учитывая высокую чувствительность  $dP/dH$  к  $\theta$  при малых  $\theta$ ) с неточной фиксацией поверхности образца относительно  $H_{\perp}$ , обусловленной его малыми размерами.

демонстрирующих угловую зависимость формы линии поглощения и характера гистерезиса  $dP/dH$ , при смене направления сканирования  $H_{\pm}$  с частотой  $50 \text{ Гц}^3$ ).

2. Петля гистерезиса в монокристаллах значительно шире:  $(4 - 6) \cdot 10^{-3} \text{ Т}$  по сравнению с  $(1 - 2) \cdot 10^{-3} \text{ Т}$  в керамических образцах (при времени сканирования  $H_{\pm} \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ ), см. рис. 2ж.

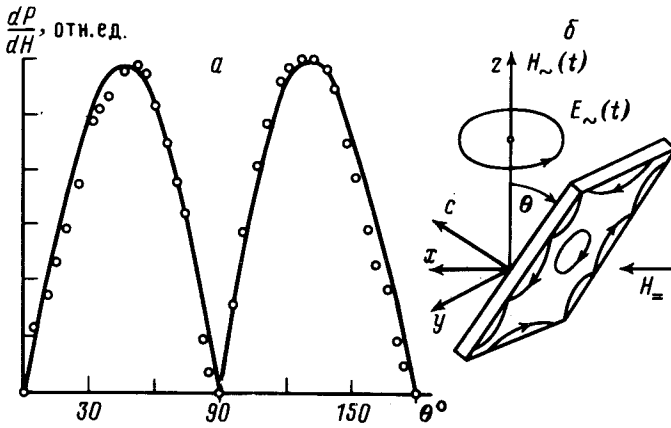


Рис. 1. Угловая зависимость  $\frac{dP}{dH}(\theta)$ ,  $H_{\pm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ ,  $T = 77 \text{ К}$ ; б – ориентация кристалла относительно  $H_{\pm}$  и  $H_{\sim}$

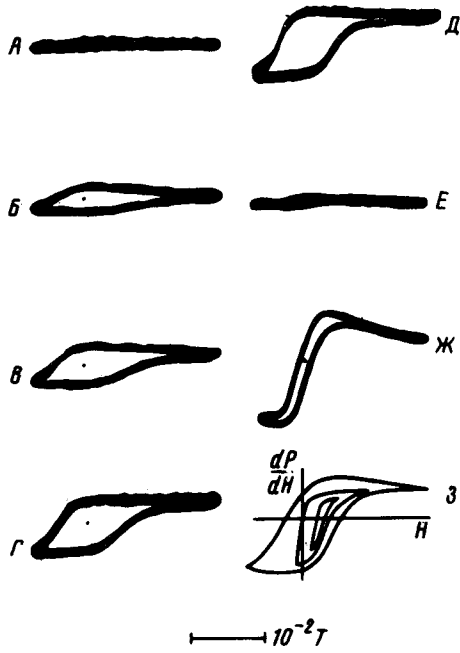


Рис. 2

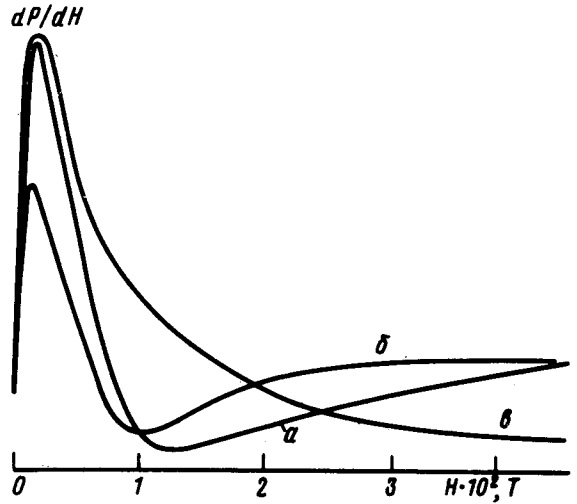


Рис. 3

Рис. 2. Гистерезис  $dP/dH$  – а, б, в, г, д:  $\theta = 0; 5; 10; 25; 45; 90^{\circ}$ , соответственно; ж – керамика, при любых  $\theta$ ; з – вариация амплитуды модуляции  $H_{\sim}$  при постоянном смещении  $H_{\pm}^0 = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ ,  $\theta = 45^{\circ}$ ,  $T = 77 \text{ К}$

Рис. 3. Типичные для монокристаллов ЭПР-спектры: а –  $\theta = 45^{\circ}$ , б –  $\theta = 5^{\circ}$ , образец 4; в –  $\theta = 45^{\circ}$ , образец 7

3) Для выявления вклада в характер поглощения электрической компоненты СВЧ поля производилось перемещение образца размером  $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$  в резонаторе на расстояние  $4 - 5 \text{ мм}$  (при различных ориентациях кристалла). Оно не приводило к заметным изменениям сигнала. Поэтому можно полагать, что в данном случае определяющей в поглощении энергии СВЧ поля является магнитная компонента.

3. В монокристаллах, также как и керамических образцах, поглощение имеет характерную для электронов проводимости в металлах форму (см. рис. 3), на котором представлены типичные кривые  $\frac{dP}{dH}(H)$ , полученные на различных монокристаллах.

Зависимость амплитуды и формы ЭПР-сигнала от ориентации плоскости кристалла относительно направления как постоянного, так и переменного магнитных полей, положительный знак  $dP/dH$  в области малых  $H_{\perp}$  (он таков же как и знак  $dP/dH$  на переднем фронте линии поглощения ДФПГ), ставит под сомнение возможность трактовки указанных закономерностей в рамках джозефсоновской либо другой нерезонансной идеологии.

Пропорциональность амплитуды  $\frac{dP}{dH} \sim \sin 2\theta$  может найти простую интерпретацию в рамках боровской модели диамагнетизма электронов в условиях, когда часть носителей заряда, испытывающая отражения от поверхности образца создает из "скачущих" орбит замкнутый контур, тока, лежащий в плоскости образца<sup>12</sup>. При этом направление тока в контуре противоположно току замкнутых орбит носителей заряда, а общий магнитный момент  $M = M^{max} \cos \theta$  направлен по нормали к поверхности (т.е. по оси  $C$ ). Носители на скачущих орбитах большую часть времени проводят в скин-слое, что обеспечивает выполнение условий для резонансного поглощения СВЧ поля<sup>13</sup>. Среднее за период поглощение равно, как известно<sup>14</sup>,  $\overline{P} = \overline{M \dot{H}}(t) \sim \sin \theta \cos \theta$ .

В керамических образцах ЭПР-сигнал не зависит от ориентации всего образца относительно  $H_{\perp}$ , так как является суммой сигналов от каждого из большого числа приповерхностных зерен с различной ориентацией.

Для объяснения совокупности экспериментальных данных на микроскопическом уровне необходимо, вероятно, учесть: а) высокую степень неоднородности полного магнитного поля в приповерхностной области, которая характерна для сверхпроводников; б) присутствие в данных материалах атомов тяжелых металлов, способствующих проявлению спин-орбитального взаимодействия зонных носителей заряда<sup>15</sup>. Благодаря этому носители можно рассматривать как квазичастицы с эффективным магнитным моментом, содержащем спиновую и орбитальную составляющие, при этом характер межуровневых переходов токов, что становится возможным осуществление орбитальных переходов за счет магнитной компоненты СВЧ поля<sup>16</sup>. Орбитальная составляющая, судя по большому значению  $g$ -фактора, более 200 (соответственно мала и эффективная масса менее  $10^{-2}$  от массы свободного носителя), является в данном случае преобладающей.

Авторы приносят глубокую благодарность Л.П.Козеевой и А.А.Павлюку за предоставление монокристаллов.

#### Литература

1. Blazey K.W., Muller K.A., Bednorz I.G. et al. Phys. Rev. B, 1987, 36, 7241.
2. Stankowski I., Kohol P.K. et al. Phys. Rev. B, 1987, 36, 7126.
3. Khachagan K. et al. Phys. Rev. B, 1987, 36, 8306.
4. Shrivastava K.N. J. Phys. C, 1987, 20, 789.
5. Мастеров В.Ф., Егоров А.И., Герасимов Н.П. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 289.
6. Durny B., Hantala I., Ducharme S. et al. Phys. Rev. B, 1987, 36, 2361.
7. Bhat S.V., Gangully P. et al. J. Phys. C, 1987, 20, L559.
8. Веснин Ю.И., Истомин В.Е., Косцов Э.Г. Письма в ЖТФ, 1988, 14, 185.
9. Веснин Ю.И., Истомин В.Е., Косцов Э.Г. Письма в ЖТФ, 1988, 14, 1241.
10. Козеева Л.П., Иванникова Н.В., Павлюк А.А. Выращивание кристаллов ВТСП. Препринт № 88-11, ИНХ СО АН СССР, 1988.
11. Богачев С.В., Емельченко Г.А., Ильин В.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 166.
12. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
13. Абрикосов А.А. Введение в теорию нормальных металлов. М.: Наука, 1972.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

15. *Лифшиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И.* Электронная теория металлов. М.: Наука, 1971.

16. *Рашба Э.И.* УФН, 1964, **IXXXIV**, 557.

Институт автоматизации и электрометрии  
Сибирское отделение Академии наук СССР

Институт неорганической химии  
Сибирское отделение Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
29 июля 1988 г.

---